

考虑信号控制影响的低频浮动车路径估计

王志建, 马超锋, 刘小明

(北方工业大学 城市道路交通智能控制技术北京市重点实验室, 北京 100144)

摘要:针对低频浮动车中相邻 GPS 匹配点跨越多个路段的路径估计问题, 考虑信号控制以及其他影响绕行的因素, 建立最优路径的层次分析模型。首先, 选取评价指标进行模糊等级划分; 其次, 利用各指标间的判断矩阵和权重系数向量得到各路段阻抗因子; 最后, 以路段阻抗代替路段长度, 利用 Dijkstra 搜索算法找到最“短”路径, 判定为浮动车驾驶者最可能的行驶路径。以北京市石景山区实际车辆 GPS 数据为例, 选取其中跨越多路段的 GPS 点进行分析, 所得路径估计结果与该车实际行驶路径相一致。

关键词:信号控制; 低频采样; 路径估计; 层次分析法; 模糊理论; Dijkstra 算法

中图分类号: U491; TP18

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2015)01-0047-07

Trajectory Estimation of the Low-Frequency Floating Car Under Traffic Signal Control

Wang Zhijian, Ma Chaofeng, Liu Xiaoming

(Beijing Key Lab of Urban Intelligent Traffic Control Technology, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: To study the trajectory estimation of adjacent GPS match points across multiple intersections in the low-frequency sampling floating car system, the analytic hierarchy process model of optimal path was established with consideration of signal control and other factors that affect the bypass. The actual car GPS data in Beijing Shijingshan area were used for analysis. First, the evaluation indexes were selected to make fuzzy classification. Second, judgment matrix and weights vector between each indexes were used to get road resistance factor of each road sections. Finally, Dijkstra search algorithm was used to find the shortest path replaced by the minimum road resistance and the path was identified as the most likely travel route of floating car drivers. The result shows that path estimation results are consistent with the car driving route.

Key words: traffic signal control; low-frequency sample; trajectory estimation; analytic hierarchy process; fuzzy theory; Dijkstra algorithm

GPS(Global Positioning System, 全球定位系统)浮动车采集技术将车载 GPS 数据与 GIS(Geographic Information System)地图相结合, 利用相关算法可估算路段行程时间等交通参数^[1]。其中, 浮动车路径估计是估计路段行程时间的重要一步, 但由于浮动车通信成本高、海量数据存储限制和数据丢失等原因, 致使 GPS 采样周期往往较长, 车辆在采样周期内可能驶过多个路段甚至一个微路网, 大大增加了浮动车路径估计的难度。

路径估计算法的研究有很多, 吴方国^[2]对于跨越多个路口的复杂情况, 利用 Dijkstra 搜索算法找到最短路径作为车辆行驶轨迹。姚恩建等^[3]建立了低频采样周期内的 GPS 点筛选候选匹配链路, 并利用最短路算法获得浮动车行驶的候选路径集, 通过模糊逻辑推理确定最终行驶路径。但这些算法仅以路径长度作为轨

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 首都世界城市顺畅交通协同创新中心项目(PXM2014_014212_000020); 城市道路交通智能控制人才培养项目(PXM2014_014212_000053); 北京市产学研联合培养研究生基地项目(PXM2014_014212_000032)

作者简介: 王志建(1982—), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士, 主要从事智能交通系统研究。E-mail: wzjian0722@163.com

迹估计的判据,忽略了其他可能引起驾驶者绕行的因素,如信号控制及道路状况等。刘玉玮^[4]针对车辆诱导的最优路径问题,综合道路长度、道路安全性和驾驶员主观因素,结合模糊理论方法和层次分析法得到最优路径;陈宜开等^[5]以行驶距离及通过交叉口数量为优化目标,采用 Pareto 多目标优化理论和模糊集理论进行轨迹综合判定。前者考虑的评价指标无法适用于低频 GPS 浮动车路径估计,后者的优化目标考虑因素不够全面。

针对相邻 GPS 匹配点跨越多个路段的路径估计问题,本研究综合考虑信号控制及其他影响驾驶者绕行的因素,建立路径估计的层次分析模型,并利用实际数据进行算法验证。

1 研究方案

浮动车路径的准确估计首先要进行准确的地图匹配^[6]。如图 1 所示,如果 GPS 数据点没有被准确定位,就可能导致两个完全不同的路径估计结果。对此,依据文献[7]基于拓扑判断的延时地图匹配算法,可以有效提高地图匹配结果。

图 2 中,当两个相邻 GPS 匹配点跨越一个微型路网时,起止 GPS 点 P_1 和 P_2 之间连接路径并不唯一,无法确定浮动车司机在实际行驶过程中具体选择了哪一条路径,这就需要通过合理的方法进行事后判断,依据一定的标准选出最可信路径。本研究在 GPS 点已精确匹配的前提下,对 GPS 跨越微型路网的情况进行路径估计,建立以交通信号控制和其他影响驾驶者路径选择的因素为评价指标的层次分析模型^[8],结合模糊综合评价理论^[9]和 Dijkstra 搜索算法^[10],以各路段的阻抗因子代替路段长度,最终得到阻抗最小的路径即为浮动车的最可能行驶轨迹。

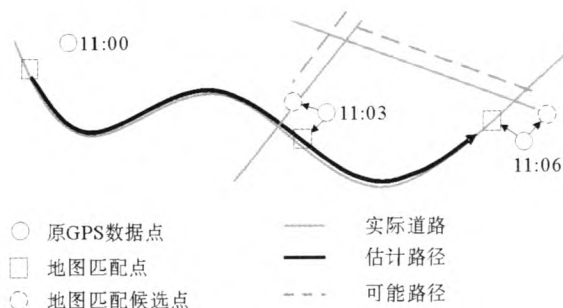


图 1 地图匹配与 GPS 浮动车路径估计

Fig. 1 Map matching and GPS floating car path estimation

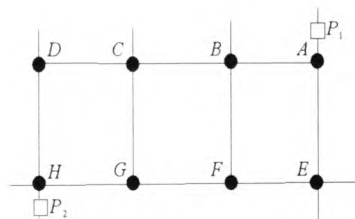


图 2 相邻 GPS 匹配点跨越微型路网

Fig. 2 Micro-road network between adjacent GPS matching points

2 模型算法

2.1 构建层次分析指标体系

针对浮动车路径估计,构建评价指标体系既要有一般统计指标的共性,又要有浮动车系统自身的特性。经过相关调查研究,建立以路段阻抗为目标层,以延误时间、道路属性及安全性为准则层,多影响因素为指标层的评价指标体系,如图 3 所示。

2.2 指标评价标准

2.2.1 延误时间

准则层中延误时间的指标有信号周期和道路实时路况等级,其中信号周期隶属度函数为 U_i ,对于无信号灯控制的路口,假定周期为 50 s 即 $U_{i1} = 1$,如图 4 所示。

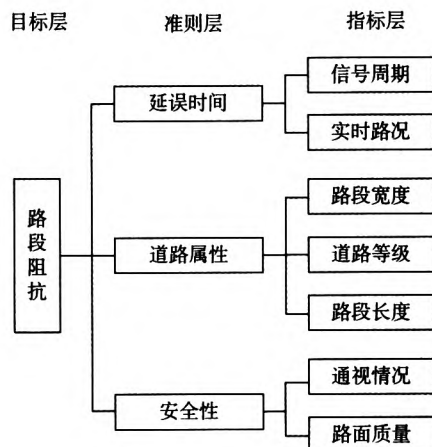


图 3 层析分析评价指标体系

Fig. 3 The evaluation index system of Chromatographic analysis

道路实时路况为浮动车驾驶者通过导航仪、交通广播或者诱导屏所能接收到的实时路况信息,分为严重拥堵、拥堵、拥挤、正常、畅通五级,其隶属度函数 U_4 如图 5 所示。

2.2.2 道路属性

道路属性包含路段宽度,道路等级和路段长度三个评价指标,其隶属度函数分别为 U_w , U_g 和 U_l , 如图 6、图 7 和表 1 所示。

2.2.3 安全性

安全性包括通视情况和路面质量两个指标,其隶属度函数分别为 U_q 和 U_v , 划分如图 8 和表 2 所示。

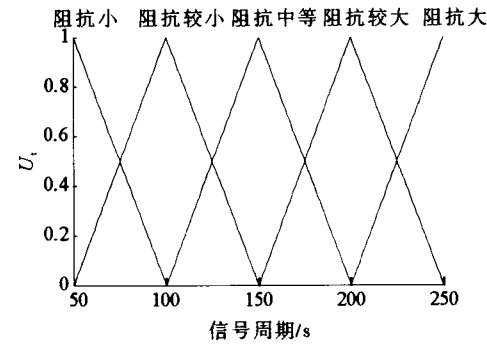


图 4 信号周期隶属度

Fig. 4 Signal cycle membership degree

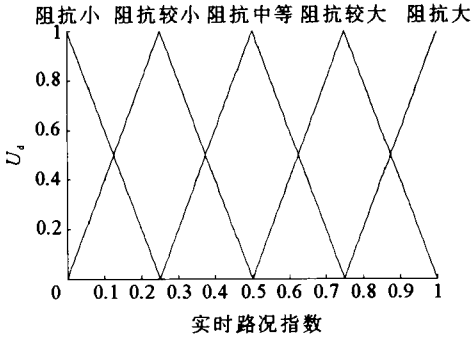


图 5 实时路况指数隶属度

Fig. 5 Real-time traffic conditions membership degree

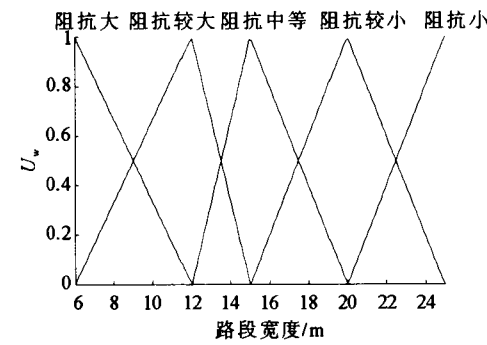


图 6 路段宽度隶属度

Fig. 6 Road width membership degree

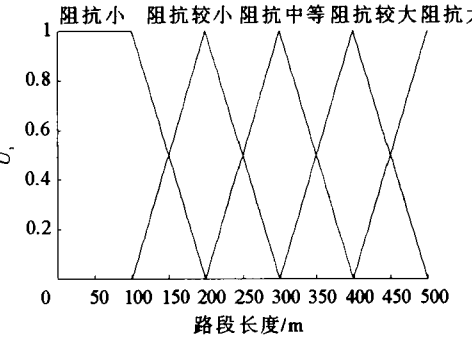


图 7 路段长度隶属度

Fig. 7 Road length membership degree

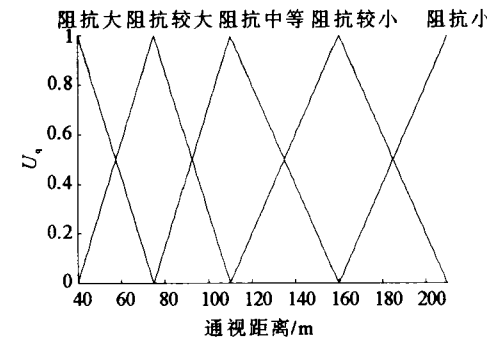


图 8 通视距离隶属度

Fig. 8 Visibility distance membership degree

表 1 道路等级隶属度

Tab. 1 Road grade membership degree

道路等级	高速公路	一	二	三	四
对应评语	小	较小	中等	较大	大
U_g	1	1	1	1	1

表 2 路面质量隶属度

Tab. 2 Pavement quality membership degree

路面质量	混凝土	贯入碎石	受损混凝土	沙石路面	碎石土路
对应评语	小	较小	中等	较大	大
U_v	1	1	1	1	1

2.3 权系数向量

建立各准则之间和同一准则下各指标之间的权重向量,首先需要构造各因素间的判断矩阵,矩阵中的值

为两两因素重要性之比,然后根据矩阵的最大向量法则得出各层的权系数向量。

1)构造准则层三个因素间的判断矩阵 P_1 。对驾驶者的问卷调查结果显示,驾驶者对这三个因素的重要性进行排序,依次为延误时间、道路属性、安全性,采用标度法构造判断矩阵为

$$P_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3}{2} & 3 \\ \frac{2}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, a_{ij} 表示两个元素相比, i 对 j 的重要程度之比。 P_1 是可以随着经验的丰富和出行需求的变化不断修正的。由判断矩阵 P_1 的最大特征向量可得到准则层的权系数向量为

$$W_1 = (0.5 \quad 0.33 \quad 0.17) \quad (2)$$

2)认定驾驶者对信号周期和实时路况的重要性一致,构造延误时间下各指标的判断矩阵和权系数向量为

$$P_2 = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$W_2 = (0.5 \quad 0.5) \quad (4)$$

3)认定驾驶者对三因素重要性排序为路段宽度、道路等级、路段长度,构造道路属性下各指标的判断矩阵和权系数向量为

$$P_3 = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{3}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$W_3 = (0.17 \quad 0.33 \quad 0.5) \quad (6)$$

4)认定驾驶者对通视情况和路面质量的重要性相同,构造延误时间下各指标的判断矩阵和权系数向量为

$$P_4 = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$W_4 = (0.5 \quad 0.5) \quad (8)$$

进行一致性检验:首先计算一致性指标 $C_1 = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$,选取判断矩阵的平均随机一致性指标 R_1 (指标数为2时取0,指标数为3时取0.58),计算随机一致性比例 $C_R = C_1/R_1$,得到以上四个判断矩阵 $C_R < 0.1$,即可认为判断矩阵具有一致性。

2.4 建立最优路径模型

1)首先,依据各指标的隶属度函数,对微型路网中的每条路段进行模糊评价,得到各准则下的模糊评价矩阵:

$$R = [U_1^T \quad U_2^T \quad \cdots \quad U_n^T]^T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: r_{ij} 表示第 i 个指标对于第 j 个评语的隶属度, n 表示评语等级, m 表示指标的个数。

2)利用模糊综合判别,将模糊矩阵 R 与相应的权系数向量 W 相乘,可得到每条路段的综合评价向量:

$$Q = WR = W_1[W_2R_1 \quad W_3R_2 \quad W_4R_3]^T \quad (10)$$

其中:向量 Q 中各项元素分别表示当前路段的阻抗值小、较小、中等、较大、大的程度。

3)引入阻抗匹配度向量 $\lambda = (\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4 \quad \lambda_5)$,即:针对路段阻抗的评价目标,各评价指标与阻抗的匹配程度。考虑到路段的阻抗匹配度随着各指标的模糊等级提高而增加,得到 $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4 < \lambda_5$ 且

$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 1$ 。由 $\mu = Q\lambda^T$ 得到每条路段阻抗的最终评判因子 μ 。
4)最后,用阻抗评判因子代替每条路段的长度,利用 Dijkstra 搜索算法在微型路网中搜索两 GPS 点之间的最“短”路径,即阻抗最小的最优路径,作为驾驶者最可能的行驶路径。

3 算法验证

3.1 路网数据调查

以北京市石景山区一组实际车辆 GPS 数据为例,对其中跨越多路段的 GPS 点进行分析,如图 9 所示:两个相邻 GPS 点 P_1 和 P_2 跨越一个微路网,交叉口 A 到 H 为其路段的分界点(路段包含下游交叉口)。表 3 给出了该时间段内此路网实际情况的研究数据。

3.2 结果验证

以路段 AB 为例,依据模型的算法流程,计算 AB 段综合评价向量 Q (表 4),并结合匹配度特征和文献 [5]构建匹配度向量 $\lambda = (0.02 \ 0.08 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.4)$,则路段阻抗的评判因子 $\mu_{AB} = Q\lambda^T = 0.134$ 。同理,可得到路网中各路段的评判因子见表 5。

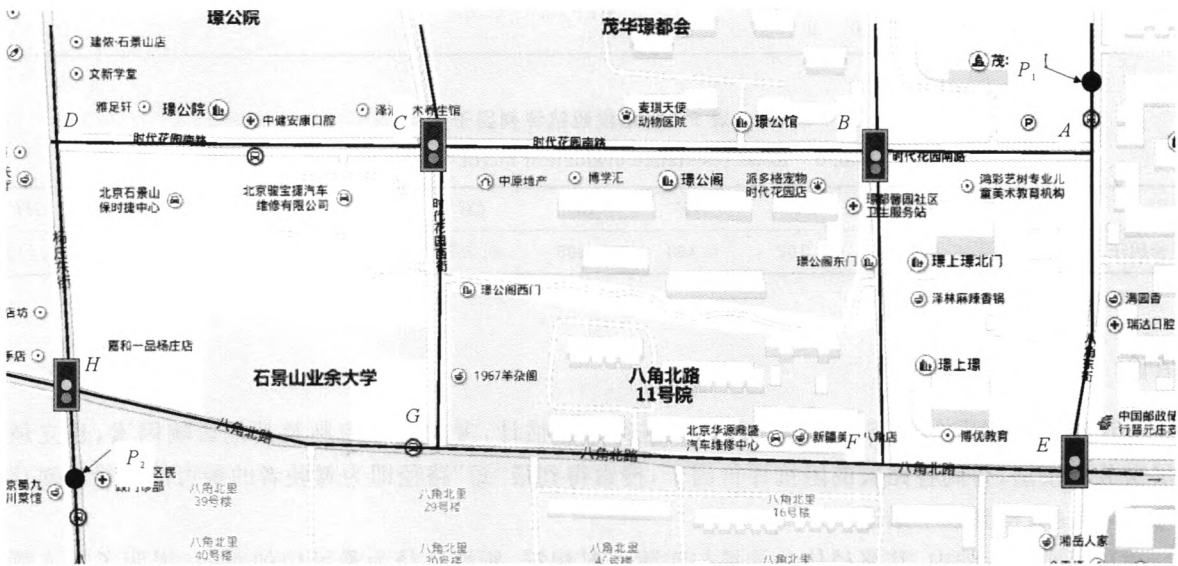


图 9 八角地区路网
Fig. 9 The road network of Bajiao area

表 3 路网调查数据
Tab. 3 Data of road network

路段	信号周期/s	路况指数	车道宽度/m	道路等级	路段长度/m	通视情况/m	路面质量
AB	100	0.3	19	三	150	140	混凝土
BC	100	0.3	19	三	300	140	混凝土
CD	无	0.3	19	三	260	140	混凝土
AE	120	0.5	15	三	220	120	混凝土
BF	无	0.2	15	三	215	140	混凝土
CG	无	0.2	19	三	205	140	混凝土
DH	140	0.6	12	二	170	100	受损混凝土
EF	无	0.5	12	二	135	80	混凝土
FG	无	0.5	12	二	310	80	混凝土
GH	无	0.5	12	二	265	80	混凝土

注:无信号灯的路段在信号周期“短”隶属度为 1

用阻抗评判因子代替每条路段的长度,利用 Dijkstra 算法搜索得到最“短”路径为 $P_1-A-B-C-G-H-P_2$,其总评判因子等于 0.497,该路径即可认定为驾驶者最可信的行驶轨迹。从现场实际情况来看,AD 段为新修道路,双向四车道且视野开阔,为理想的行车路径;DH 段车流量大,路况也较差,行车拥挤,所以熟悉道路或实时路况的驾驶者往往会绕开行驶。

表 4 计算路段 AB 评价向量 Q

Tab. 4 Evaluation vector Q calculation of AB section

准则层	模糊评价矩阵 R	权系数向量 W	综合评价向量 Q
延误时间	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$W_2 = (0.5 \quad 0.5)$	
道路属性	$\begin{bmatrix} 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$W_3 = (0.17 \quad 0.33 \quad 0.50)$	$(0.168 \quad 0.428 \quad 0.245 \quad 0.159 \quad 0)$
安全性	$\begin{bmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$W_4 = (0.5 \quad 0.5)$	

表 5 各路段阻抗评判因子

Tab. 5 Road resistance evaluation factor of each section

路段	AB	BC	CD	AE	BF	CG	DH	EF	FG	GH
评价因子	0.134	0.130	0.107	0.160	0.095	0.087	0.171	0.126	0.154	0.146

4 结论

针对浮动车相邻两个 GPS 点跨越微型路网进行路径估计,考虑信号控制及其他影响因素,建立最优路径的层次分析模型,得到各路段的阻抗评价因子,搜索得到最“短”路径即为驾驶者的最可能路径。对比验证结果与实际数据,得到以下结论:

1)在车辆实际行驶中,其路径估计结果与实际情况相符,所得路径为最可信的路径,说明了本文算法的有效性和准确性。

2)本算法和实验验证建立在驾驶者对路网熟悉程度较高的情况下,所考虑的因素为驾驶者所熟悉,所以该算法对出租车 GPS 数据准确性相对较高,对不熟悉道路的驾驶者可能估计不足。

3)本研究考虑了信号周期和实时路况信息等动态交通因素,一方面能够对驾驶者因动态信息而改变行驶轨迹的情况进行充分考虑和判断;另一方面受限于对驾驶者交通信息的获取方式和敏感度的未知,路径估计结果也会有偏差。

参考文献:

- [1]Taylor G, Blewitt G, Steup D, et al. Road reduction filtering for GPS-GIS navigation[J]. Transactions in GIS, 2001, 5(3): 193-207.
- [2]吴方国. 采用低频采样浮动车数据的城市路段行程时间估计与预测[D]. 杭州:浙江工业大学, 2010:13-17.
- [3]姚思建, 左婷. 基于低频浮动车数据的实时地图匹配算法[J]. 北京工业大学学报, 2013(6):909-913.
- Yao Enjian, Zuo Ting. Real-time map matching algorithm based on low-sampling-rate probe vehicle data[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013(6):909-913.
- [4]刘玉玮. 智能交通中最优路径算法的研究与实现[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013:21-33.
- [5]陈宜开. 城市路网交通流分析研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008:29-40.
- [6]Quddus M A, Ochieng W Y, Noland R B. A general map matching algorithm for transport telematics application[J]. Journal

of Navigation, 2005, 13(2): 116-119.

- [7] 王志建, 王力, 汪建. 基于拓扑判断的海量 GPS 数据延时地图匹配算法[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(5): 861-866.
Wang Zhijian, Wang Li, Wang Jian. Delay map matching algorithm of mass GPS data based on topological judgment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(5): 861-866.
- [8] 王珍珍. 城市绿色交通评价指标及方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 19-44.
- [9] Jiang G, Wang J, Zhang X, et al. The study on the application of fuzzy clustering analysis in the dynamic identification of road traffic state[C]//6th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Shanghai, Oct. 12-15, 2003: 1149-1152.
- [10] Zhan F B. Three fastest shortest path algorithms on real road networks: Data structures and procedures[J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1997, 1(1): 69-82.

(责任编辑: 吕文红)

(上接第 46 页)

参考文献:

- [1] van der Aalst W M P. Process mining: Discovery, conformance and enhancement of business processes[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 1-10.
- [2] Rodríguez A, Fernández-Medina E, Piattini M. A BPMN extension for the modeling of security requirements in business processes[J]. IEICE transactions on information and systems, 2007, 90(4): 745-752.
- [3] van der Aalst W M P. Formalization and verification of event-driven process chains[J]. Information and Software Technology, 1999, 41(10): 639-650.
- [4] Murata T. Petri nets: Properties, analysis and applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.
- [5] van der Aalst W M P, Adriansyah A, van Dongen B F. Replaying history on process models for conformance checking and performance analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2012, 2(2): 182-192.
- [6] Fahland D, van der Aalst W M P. Repairing process models to reflect reality[C]//Business Process Management, Lecture Notes in Computer Science(7481), Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 229-245.
- [7] Adriansyah A, van Dongen B F, van der Aalst W M P. Conformance checking using cost-based fitness analysis[C]//15th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference. Helsinki, Finland. Aug. 29-Sep. 2, 2011: 55-64.
- [8] Buijs J C A M, van Dongen B F, van der Aalst W M P. A genetic algorithm for discovering process trees[C]//2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Canberra, Australia, June 10-15, 2012: 1-8.

(责任编辑: 吕文红)